中国生态农业学报 2016 年 9 月 第 24 卷 第 9 期
Chinese Journal of Eco-Agriculture, Sep. 2016, 24(9): 1239−1245

DOI: 10.13930/j.cnki.cjea.160056

热胁迫对不同小麦品种灌浆速率的影响*

赵彦坤 王秀堂 王 静 傅晓艺 董章辉 史占良 郭进考 何明琦**

(石家庄市农林科学研究院 石家庄 050041)

摘 要 为了给小麦高产稳产和耐热新品种选育提供依据，对北部冬麦区和黄淮冬麦区的 12 个推广小麦品种在正常及热胁迫下的产量、千粒重及灌浆过程进行了研究。试验于 2014—2015 年度在河北省辛集马兰农场进行，用大棚升温作为热胁迫处理，在小麦灌浆期对不同品种在正常及热胁迫处理下的灌浆速率进行测定，收获后测定产量和千粒重，并计算热感指数。结果表明，'中麦 175'、'衡 4399'、'衡 4444'、'CA0816'和'中麦 875'在自然生长及热胁迫处理下有较高的产量。在小麦灌浆中后期的籽粒快增期及缓增期发生的热胁迫会通过影响灌浆速率显著影响小麦的千粒重及产量。根据千粒重热感指数对不同小麦品种的耐热性进行评估，发现'京冬 8 号'、'CA0816'、'CA1062'、'中麦 875'、'中麦 895'及'衡 4444'的千粒重热感指数<1，是耐热性较好的品种；其他品种的千粒重热感指数≥1，是热敏感品种。对不同品种在正常及热胁迫条件下的灌浆速率进行分析，发现热胁迫对不同耐热性品种灌浆速率产生影响的起始时间不同，耐热性好的品种的灌浆速率在灌浆后期才会受到热胁迫的影响，热敏感品种在灌浆中期即受到热胁迫的影响。总之，'CA0816'、'中麦 875'和'衡 4444'是丰产性和耐热性都较好的品种；'衡 4399'和'中麦 175'的千粒重热感指数一般，但产量在自然生长及热胁迫下均较高；'京冬 8 号'耐热性好，丰产性略差。以上品种均可作为优异的耐热资源在育种中加以利用，在育种实践中需联合使用品种的产量数据和千粒重热感指数来评估该品种在耐热性育种中的价值。

关键词 小麦 热胁迫 灌浆速率 热感指数 耐热性 高产稳产
中图分类号: S162.5+3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1671-3990(2016)09-1239-07

Effects of heat stress on grain-filling rate of different wheat varieties*

ZHAO Yankun, WANG Xiutang , WANG Jing, FU Xiaoyi, DONG Zhanghui,
SHI Zhanliang, GUO Jinkao, HE Mingqi**

(Shijiazhuang Academy of Agricultural and Forestry Sciences, Shijiazhuang 050041, China)

Abstract In order to achieve high and stable yield and offer information for the selection of heat tolerant new varieties of wheat, the yield, 1000-kernel weight and grain-filling rate of 12 wheat varieties collected across the North China Wheat Belt and Huanghuai Wheat Region were studied under normal and heat treatments. The experiment was conducted in 2014–2015 at Malan Farm in Xinji, Hebei Province. A greenhouse was used as heating facility. Then grain-filling rate was measured for any increase in dry grain weight of different wheat varieties under normal and heated conditions. The yield and 1000-kernel weight were also analyzed after harvest. The results showed that yields of 'Zhongmai 175', 'Heng 4399', 'Heng 4444', 'CA0816' and 'Zhongmai 875' were higher than those of other wheat varieties under both normal and heated conditions. Wheat grain weight was significantly affected by heating during rapid and slow grain-filling stages by reducing grain-filling rate. An evaluation of heat tolerance using the thermal index of yield and 1000-kernel weight showed that 'Jingdong 8', 'CA0816', 'CA1062', 'Zhongmai 875', 'Zhongmai 895' and 'Heng 4444' were heat-tolerant wheat varieties with the thermal index less than 1. Then,

* 农业部公益性行业(农业)科研专项(201203033-06)和国家小麦现代农业产业技术体系项目(nycytx-03)资助
** 通讯作者: 何明琦，主要从事小麦育种与栽培工作。E-mail: hemingqi@163.com
赵彦坤，主要从事小麦资源鉴定工作。E-mail: kun262004@163.com
收稿日期: 2016−01−14 接受日期: 2016−04−20

* The study was supported by the Special Fund for Agro-scientific Research in the Public Interest of China (201203033-06) and the Modern Agriculture Wheat Industry of China (nycytx-03).
** Corresponding author, E-mail: hemingqi@163.com
Received Jan. 14, 2016; accepted Apr. 20, 2016

the other wheat varieties were heat -sensitive varieties with thermal index greater than or equal to 1. Wheat grain-filling rate, which was affected by high temperatures, differed for wheat varieties at grain-filling stage. Grain-filling rate of heat-tolerant varieties was affected at the last period of grain-filling whereas that of heat-sensitive varieties was affected at the middle period of grain-filling. In conclusion, 'CA0816', 'Zhongmai 875' and 'Heng 4444' wheat varieties showed both good yield and high heat-tolerance. Then 'Heng 4399' and 'Zhongmai 175' had a general thermal index for 1000-kernel weight whereas the related yield was high under both normal and heat treatments. Also 'Jingdong 8' showed a good heat tolerance with slightly lower yield. All the wheat varieties tested were as heat-tolerant wheat varieties for use in wheat breeding. We proposed further evaluation of both yield and thermal index of 1000-kernel weight in heat-tolerant wheat breeding.

Keywords Wheat; Heat stress; Grain-filling rate; Thermal index; Heat tolerance; High and stable yield

小麦是我国主要的粮食作物之一，其发育后期常受到热胁迫的危害。气候模型预测到21世纪末平均气温将增长1.8~5.8 ℃(Intergovernmental Panel on Climate Change, 2007)，小麦在生育后期受到热胁迫危害的频率将明显增加，其生长发育及高产稳产将受到严重影响[1−3]，使产量降低10%~20%[4]。在我国北方小麦种植区，籽粒灌浆过程的适宜温度为20~24 ℃，高于25 ℃或低于12 ℃都不利于籽粒灌浆，灌浆后期常有2~5 d的极端高温(大于32 ℃)，此时小麦蒸腾量大，体内水分失衡，造成小麦茎叶早衰，籽粒灌浆受抑制或不能灌浆，严重影响小麦的粒重和产量[5]。

千粒重作为产量三要素之一，对产量的稳定起着重要的作用[6]。灌浆速率对千粒重和产量的贡献较大[7]，所以灌浆过程作为影响千粒重的重要因素已经有了很广泛的研究[8−10]。冯素伟等[8]对河南省9个小麦品种的籽粒灌浆特性进行分析，发现小麦的籽粒增长呈S型曲线，可分为渐增期、快增期和缓增期，粒重主要由快增期持续时间和灌浆速率决定，与整个灌浆的时间无关；胡刚元[9]报道了河南省温度对冬小麦灌浆速率的影响，指出气温和小麦灌浆速率呈抛物线的关系，5月上中旬，气温和小麦灌浆速率成线性正相关，5月下旬平均气温和灌浆速率呈线性负相关；乔玉强等[10]报道超高产小麦的灌浆速率在灌浆早期较低，在成熟前10 d较高。

前人对灌浆期热胁迫对小麦灌浆速率及千粒重的影响也展开了一定的研究[11−14]。Lawlor等[11]认为，灌浆期的温度上升会缩短灌浆持续期，降低籽粒充实度从而降低了产量。Blum等[12]报道灌浆期的热胁迫直接导致叶片的光合反应异常，从而影响光合产物的积累和运输，降低灌浆速率。韩利明等[13]报道千粒重可以作为耐热筛选的简易指标。热感指数作为作物的耐热评价指标，从粒重和产量的热胁迫表现反映了作物对热胁迫的敏感性，是直接有效的抗热耐热鉴定方法[14]。灌浆期热胁迫对小麦品质、光合产物转运及膜脂过氧化酶的影响也有一定的研究[15−16]。胡吉帮等[17]研究了小麦灌浆早、中及后期热胁迫分别对两个小麦品种的影响，发现灌浆前期、中期受热胁迫的影响较大，后期相对较小。傅晓艺等[18]报道热胁迫降低小麦灌浆速率，增加了小麦的硬度。但不同小麦品种的耐热性差异以及热胁迫下不同耐热性品种的灌浆差异及规律有待进一步的研究。

日趋变暖的气候条件说明小麦耐热育种的研究亟待加强[19]，耐热育种通过在灌浆期施以不同的热处理来筛选抗热高产的品种[13,18]。本研究采用塑料大棚升温的方法进行热胁迫处理，分析正常环境及热胁迫下北部冬麦区和黄淮冬麦区代表小麦品种的耐热性及灌浆速率，分析不同耐热品种籽粒增长的动态规律，为小麦耐热性育种提供品种资源。

1 材料与方法

1.1 试验材料

供试小麦品种包括4个北部冬麦区的品种('CA0816'、'CA1062'、'京冬8号'和'中麦175')和8个黄淮冬麦区的品种('衡S29'、'衡4399'、'衡4444'、'衡观35'、'石4366'、'石优17'、'中麦875'和'中麦895')，由中国农业科学院作物科学研究所、河北省农林科学院旱作农业研究所和石家庄市农林科学研究院提供。试验于2014—2015年度在河北辛集马兰农场进行。小区长2.1 m, 6行区，面积为2.6 m^2。种植方式为打孔种植，种植密度为300万·hm^{-2}基本苗，和大田的播种密度相当。2014年10月6日播种，2015年6月5日收获。

1.2 试验处理

相同灌水条件下，分别于拔节前(3月20日)和扬花后(5月1日)进行灌水处理，开花后15 d(5月8日)进行塑料大棚升温，直至小麦成熟。大棚宽5 m，高2.5m，用TRSIS型温度记录仪记录棚外正常处理(对照)和棚内热处理的小麦冠层的温度(离地面约90 cm)，对照组和热处理组分别设计两次重复。

1.3　灌浆速率测定

不同品种的扬花期在 2015 年 4 月 23 日和 4 月 24 日。本试验在 4 月 24 日选取每品种扬花标准一致的主茎穗 150 穗做上标记，此后每 6 d 取 20 穗小麦至小麦成熟，最后收获后再称取小区产量及千粒重。剥取麦粒称量干重，灌浆速率由粒重除以灌浆天数得出。

1.4　统计分析

产量或千粒重热感指数 $S=(1-Y_D/Y_P)/(1-\overline{Y_D}/\overline{Y_P})$，$Y_D$为某品种在热胁迫下的产量或千粒重，$Y_P$为某品种在自然生长环境下的产量或千粒重，$\overline{Y_D}$ 为所有参试品种在热胁迫下的产量或千粒重的平均值，$\overline{Y_P}$ 为所有参试品种在自然生长环境下的产量或千粒重平均值[18]。某品种的S值越小代表该品种的耐热性越好，S值越大则说明该品种的耐热性越差，热敏感性越强。一般认为，$S<1$为耐热性品种，$S\geqslant 1$为热敏感品种[20]。

采用SPSS 22.0统计软件进行基本统计量和方差分析。

2　结果与分析

2.1　不同热胁迫处理的小麦生长环境温度

前期研究数据表明，大棚热胁迫处理时间过早会影响小穗的开花结实[13]。因此本试验在花后 15 d 进行大棚加温处理，图 1 为自然生长和热胁迫处理的日最高气温及每天气温>30 ℃的持续时间。从图中可以看出，花后 15~30 d 正常生长和热胁迫处理的温度差异多在 5 ℃以下，热胁迫处理每天高于 30 ℃的持续时间在 5 h 以内，最高温度在 32~33 ℃，此时正值小麦籽粒的快速增长时期，热胁迫处理对小麦的灌浆压力并不是很大；开花 30 d 之后，小麦籽粒的增长速度放缓，正常生长和热胁迫处理温差增大，温差都在 5 ℃以上，甚至大于 10 ℃，热胁迫处理高于 30 ℃的持续时间长达 9 h，热胁迫处理的压力很大。一般来说，小麦在环境温度大于 30 ℃的时候即停止灌浆，且高温遇到干热风或湿害即发生高温逼熟，所以灌浆中后期是易发生高温热害的时期。

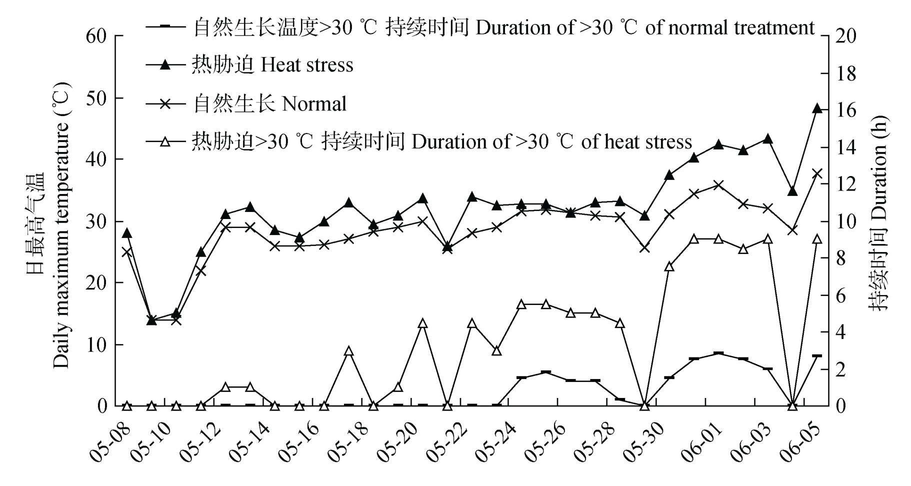


图 1　2015 年小麦开花后 15 d 至成熟期自然生长和热胁迫处理下的日最高气温及每日>30 ℃的持续时间

Fig. 1　Daily maximum temperature and duration of temperature over 30 ℃ in normal and heat stress conditions from 15 d after wheat anthesis to maturity of wheat in 2015

2.2　热胁迫处理对不同小麦品种产量、千粒重及其热感指数的影响

对参试的 12 个冬小麦品种的产量、千粒重及其热感指数进行比较(表 1)。正常生长条件下，'中麦 175'、'衡 S29'、'衡 4399'、'衡 4444'、'CA0816'和'中麦 875'具有较高的产量，而在热胁迫处理下，'中麦 175'、'CA0816'、'衡 4399'、'衡 4444'、'中麦 875'和'京冬 8 号'具有较高的产量。自然生长及热胁迫处理下产量均较高的品种为'中麦 175'、'CA0816'、'衡 4399'、'衡 4444'和'中麦 875'。'京冬 8 号'、'CA1062'、'CA0816'、'中麦 875'、'中麦 895'和'衡 4444'的产量热感指数小于 1，属于耐热性较好的品种；'衡 S29'及'石 4366'的热感指数较高，耐热性较差。参试品种中'京冬 8 号'、'中麦 895'和'中麦 875'在正常生长及热胁迫处理下的千粒重均较高，在 45~50 g 之间；'京冬 8 号'、'CA0816'、'CA1062'、'中麦 875'、'中麦 895'和'衡 4444'的千粒重热感指数均小于 1，属于耐热型品种，'衡观 35'、'石优 17'、'衡 S29'、'石 4366'的千粒重热感指数较高，属于热敏感型品种。表 1 对不同品种在自然生长及热胁迫处理下的产量及千粒重差异进行显著分析，发现除了'京冬 8 号'的千粒重未受到显著影响外，热胁迫显著降低各个品种的产量及千粒重，'京冬 8 号'的产量及千粒重热感指数在参试品种中最小，说明'京冬 8 号'的耐热性

表 1 参试小麦品种在正常生长及热胁迫处理下的产量和千粒重及其热感指数
Table 1 Yield and 1000-kernel weight under natural and heat stress conditions and their thermal indexes of the tested wheat varieties

小麦品种 Wheat variety	产量 Yield ($t\cdot hm^{-2}$)		千粒重 1000-kernel weight (g)		热感指数 Thermal index	
	自然生长 Natural condition	热处理 Heat stress	自然生长 Natural condition	热处理 Heat stress	产量 Yield	千粒重 1000-kernel weight
京冬 8 号 Jingdong 8	8.0±0.5c	6.8±0.4abc**	50.0±1.0a	48.2±1.0a ns	0.7	0.3
CA0816	8.6±0.5abc	7.2±0.4a**	43.6±0.2d	40.9±2.0c***	0.8	0.6
CA1062	7.8±0.7c	6.6±0.1abc**	47.9±1.0ab	44.8±0.6b**	0.7	0.6
中麦 875 Zhongmai 875	8.6±0.8bc	6.8±0.3abc***	49.4±0.2a	46.1±1.0ab**	0.9	0.6
中麦 895 Zhongmai 895	8.4±0.6bc	6.7±0.1abc***	49.7±0.1a	45.7±1.2ab***	0.9	0.8
衡 4444 Heng 4444	8.8±0.5abc	7.0±0.4ab***	44.2±0.4ab	40.6±0.1cd***	0.9	0.8
衡 4399 Heng 4399	9.3±0.7ab	7.1±0.3a***	42.4±0.3d	38.1±1.6de***	1.0	1.0
中麦 175 Zhongmai 175	9.6±0.6a	7.2±0.3a***	43.1±0.0d	37.2±0.8e***	1.1	1.3
衡观 35 Hengguan 35	7.9±0.7c	6.0±0 bc***	44.4±1.2cd	38.0±0.1de***	1.0	1.4
石优 17 Shiyou 17	8.4±0.4bc	6.3±0.1abc***	44.4±0.8cd	37.6±0.6e***	1.1	1.4
衡 S29 Heng S29	9.2±0.4ab	6.6±0.3abc***	42.9±0.8d	35.9±1.3e***	1.3	1.5
石 4366 Shi 4366	8.4±0.6bc	5.8±0.2c***	46.3±1.1bc	38.0±0.9e***	1.4	1.7

同列数据后不同小写字母表示品种间差异的显著性(P<0.05); ns、**和***分别表示自然生长和热胁迫处理下差异不显著和在 P<0.5、P<0.01 水平下差异显著。下同。Different letters in the same column refer to significant differences among wheat varieties ($P < 0.05$). ns, ** and *** indicated non-significant difference, significant difference at 0.05 and 0.01 levels between natural and heat stress conditions, respectively. The same below.

最好。分析产量和千粒重的热感指数的变化趋势可以看出，产量热感指数和千粒重热感指数的变化趋势一致，统计分析二者的相关系数为 0.93，即产量热感指数和千粒重热感指数二者显著相关，可以用千粒重热感指数来指示品种的耐热性。

2.3 自然生长和热胁迫处理下不同小麦品种的灌浆过程

由于不同麦区的气候差异及扬花灌浆时期的差异，会造成籽粒增长 S 曲线拐点的差异。对参试小麦品种在本地自然生长条件下的千粒重增长曲线进行分析，千粒重增长曲线的斜率即为该品种的灌浆速率。由图 2 可以看出，从扬花开始到花后 12 d 千粒重的增长较为平缓，是籽粒渐增期；从花后 12~30 d 千粒重增长迅速，属于籽粒的快增期；花后 30~42 d 千粒重的增长速度又进一步放缓，是籽粒的缓增期。

不同小麦品种在自然生长及热处理下的灌浆速率见表 2。从表 2 可以看出，灌浆初期即从开花到灌浆 12 d 的渐增期，这个时期还未进行大棚加温，籽粒的灌浆速率为 0.6~0.8 $g\cdot$千粒$^{-1}\cdot d^{-1}$，灌浆速率较低，品种间的灌浆速率没有显著差异；从灌浆 12 d 开始，籽粒的灌浆速率开始加快，灌浆 12~30 d 是籽粒的快增期，大多数品种籽粒的灌浆速率提高到 1.6~2.1 $g\cdot$千粒$^{-1}\cdot d^{-1}$，‘中麦 875’的灌浆速率提升至 2.1 $g\cdot$千粒$^{-1}\cdot d^{-1}$，是灌浆快增期灌浆速率提升最快的一个品种，快增期是所有品种籽粒灌浆速率最大的时期；30 d 后，籽粒的灌浆速率下降，不同品种在灌浆后期的差异比较大，灌浆速率在 0.2~0.7 $g\cdot$千粒$^{-1}\cdot d^{-1}$。热胁迫处理在快增期开始进行大棚加温，不同小麦品种对热处理的响应存在明显的差异。‘石 4366’、‘衡 S29’、‘石优 17’、‘衡观 35’和‘中麦 175’的灌浆速率受到显著影响，而其他几个品种的灌浆速率和自然生长的没有显著差异。

对不同小麦品种在正常生长和热处理下千粒重增长曲线进行比较分析(图 2)，按照不同小麦品种的千粒重热感指数进行升序排列(表 1)，发现‘京冬 8 号’的耐热性最好，其籽粒灌浆在热处理和自然生长条件下的曲线基本重合。随着小麦品种耐热性的降低，其灌浆差异出现的时间越来越早。其中‘CA0816’和‘CA1062’的热感指数为 0.6，耐热性较好，其在热处理下的灌浆差异出现在灌浆 36 d；‘中麦 875’，‘中麦 895’、‘衡 4444’及‘衡 4399’的热感指数在 0.6~1.0 之间，耐热性属于中等偏上，这些品种的灌浆差异出现在灌浆 30 d；‘衡 4399’的热感指数为 1.0，属于中等耐热性品种，其在热处理下灌浆 30 d 后千粒重基本没有增长。上述耐热性较好以及中等耐热品种热处理和自然生长下的灌浆差异出现在灌浆缓增期。‘中麦 175’、‘衡 4399’、‘石优 17’、‘衡 S29’及‘石 4366’的千粒重热感指数在 1.3~1.7 之间，其热处理和正常条件下的灌浆差异在灌浆快增期即出现，所以对千粒重的影响较大，属于耐热性较差的品种。

3 讨论与结论

本研究通过分析黄淮冬麦区的气候特征，发现

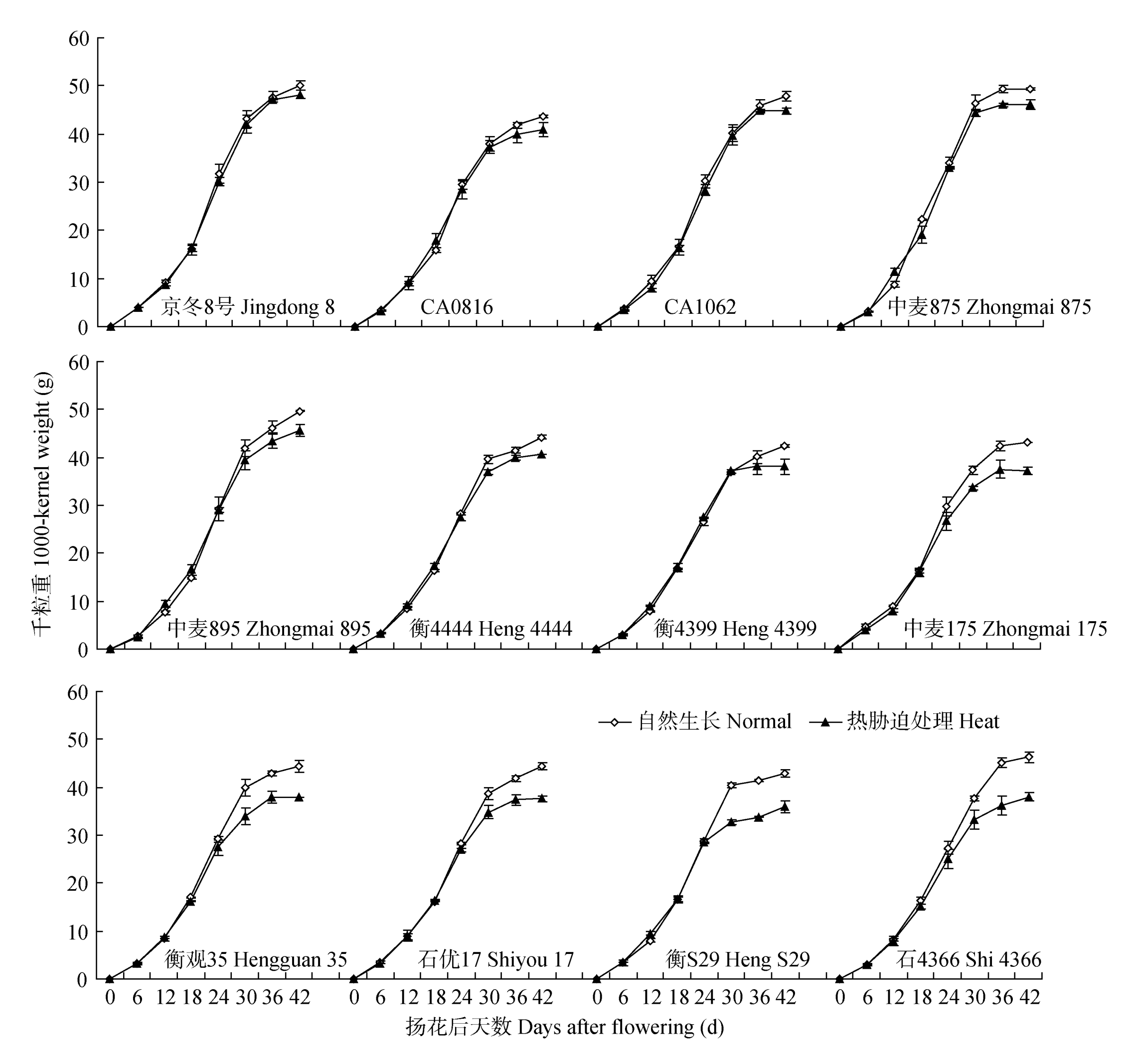


图 2　参试小麦品种在自然生长和热胁迫处理条件下千粒重增长曲线

Fig. 2　Curves of 1000-kernel weight of the tested wheat varieties under normal and heat stress conditions

表 2　参试小麦品种在自然生长及热胁迫处理下不同灌浆时期的灌浆速率

Table 2　Grain filling rates at different filling stages of the tested wheat varieties under natural and heat stress conditions

小麦品种 Wheat variety	自然生长 Natural condition			热处理 Heat stress	
	渐增期(0~12 d) Gradual increase stage	快增期(12~30 d) Rapid increase stage	缓增期(30~42 d) Slow increase period	快增期(12~30 d) Rapid increase stage	缓增期(30~42 d) Slow increase period
石 4366 Shi 4366	0.7±0.1a	1.6±0.1c	0.7±0.1a	1.4±0.1def**	0.4±0.1ab***
衡 S29 Heng S29	0.7±0.1a	1.8±0.1bc	0.2±0.1f	1.3±0.1f***	0.3±0.1bc ns
石优 17 Shiyou 17	0.7±0.1a	1.7±0.1bc	0.5±0.1bcd	1.4±0.1ef**	0.2±0.1c ***
衡观 35 Hengguan 35	0.7±0.1a	1.7±0.1bc	0.4±0.1def	1.4±0.2ef**	0.3±0.1bc ns
中麦 175 Zhongmai 175	0.7±0.1a	1.6±0.1c	0.5±0.1bcd	1.4±0.1ef**	0.3±0.1bc**
衡 4399 Heng 4399	0.7±0.1a	1.6±0.1c	0.4±0.1cd	1.6±0.1abcd ns	0.1±0.1c***
衡 4444 Heng 4444	0.7±0.1a	1.7±0.1bc	0.4±0.1cde	1.5±0.1cde ns	0.3±0.1bc ns
中麦 895 Zhongmai 895	0.6±0.1a	1.9±0.2ab	0.6±0.1ab	1.7±0.2abcd ns	0.5±0.1a ns
中麦 875 Zhongmai875	0.7±0.1a	2.1±0.1a	0.2±0.1ef	1.8±0.1ab ns	0.1±0.1c ns
CA0816	0.7±0.1a	1.6±0.1c	0.5±0.1bcd	1.6±0.1bcde ns	0.3±0.1bc**
CA1062	0.8±0.1a	1.7±0.2bc	0.6±0.1ab	1.7±0.2abc ns	0.4±0.1a ns
京冬 8 号 Jingdong 8	0.8±0.1a	1.9±0.1ab	0.6±0.1bc	1.8±0.2a ns	0.5±0.1a ns

该麦区在灌浆前期的日最高气温很少超过 30 ℃，是适宜灌浆的温度，5 月下旬和 6 月上旬的灌浆中后期极易发生高于 30 ℃的高温天气。从本次试验温度记录数据可以看出(图 1)，在小麦灌浆快增期后期(花后 20~30 d)，小麦生长温度在正午已经突破 30 ℃，超过小麦灌浆的适宜温度；在小麦灌浆后期的缓增期(花后 30 d—成熟)热胁迫的温度更高，时间更长，此时的小麦极易受到热胁迫，减缓或终止灌浆过程，导致高温逼熟。胡吉帮等[17]利用人工气候箱模拟灌浆不同时期的热胁迫，认为灌浆早期和中期的热胁迫对小麦的产量影响最大，后期相对较小。本研究以自然气候为依据，认为灌浆中后期是小麦热胁迫的高发期，对小麦生产影响较大。

本研究通过调查灌浆中后期的热胁迫对小麦灌浆速率、千粒重及产量的影响，发现热胁迫普遍降低小麦的灌浆速率、千粒重及产量，与前人的研究结果一致[7,17−18]。但是前人没有对不同品种的耐热性差异以及不同耐热型的品种的灌浆差异规律进行深入的分析。本研究分析不同品种在自然生长及热胁迫处理下的产量及千粒重差异以及产量、千粒重热感指数，发现‘中麦 175’和‘衡 4399’都是丰产性很好的品种，虽然其千粒重热感指数表现一般，但是在自然生长及热胁迫下均有较高的产量；‘CA0816’、‘中麦 875’和‘衡 4444’是丰产性和耐热性都较好的品种；‘京冬 8 号’的耐热性表现最为突出。上述 6 个品种可以在耐热性育种中作为亲本，用于培育高产耐热品种。‘衡 S29’的产量较高，但由于其耐热性差，在热处理下的千粒重和产量都受到严重的影响，应利用其丰产性改良其耐热性加以利用。分析自然生长及热处理下灌浆速率的特征，发现不同小麦品种对热处理的敏感性不同，灌浆速率受影响的程度不同。热胁迫对小麦灌浆速率的影响首先表现在降低灌浆速率的开始时间上，耐热性较好的品种(千粒重热感指数<1.0)灌浆速率受影响的时间主要出现在灌浆 30 d 后，灌浆 30 d 后的灌浆速率降低，但灌浆时长基本不受影响；中等耐热品种(千粒重热感指数 1.0)在热处理下灌浆 30 d 后灌浆过程即停止(如‘衡 4399’)，即缩短了灌浆时间，但是灌浆前中期的过程基本不受影响；对热胁迫比较敏感的品种(千粒重热感指数>1.0)在热处理下灌浆速率受影响的时间提前，在快速灌浆期的灌浆速率即开始降低，因此快速灌浆期灌浆速率的大小对千粒重的影响更大。

在育种实践中需联合使用品种的产量数据和千粒重热感指数来评估该品种在耐热性育种中的价值。‘CA0816’、‘中麦 875’、‘衡 4444’、‘衡 4399’、‘中麦 175’和‘京冬 8 号’都可以作为优异的种质资源在耐热育种中加以利用。

参考文献 References

[1] 蔡士宾，曹旸，方先文，等. 小麦灌浆期水渍和高温对植株早衰和籽粒增重的影响[J]. 作物学报, 1994, 20(4): 457–464
Cai S B, Cao Y, Fang X W, et al. Effect of waterlogging and high temperature on plant senescence and kernel weight of wheat during the grain-filling stage[J]. Acta Agronomica Sinica, 1994, 20(4): 457–464

[2] 吴宏亮，周续莲，康建宏. 花后高温干旱对小麦淀粉形成的研究进展[J]. 农业科学研究, 2011, 32(3): 67–71
Wu H L, Zhou X L, Kang J H. Progress on starch formation under the high temperature and drought after blossom of wheat[J]. Journal of Agricultural Sciences, 2011, 32(3): 67–71

[3] Fischer R A. Number of kernels in wheat crops and the influence of solar radiation and temperature[J]. The Journal of Agricultural Science, 1985, 15(2): 447–461

[4] 张平平，何中虎，夏先春，等. 高温胁迫对小麦蛋白质和淀粉品质影响的研究进展[J]. 麦类作物学报，2005，25(5): 129–132
Zhang P P, He Z H, Xia X C, et al. Effect of heat stress on wheat protein and starch quality[J]. Journal of Triticeae Crops, 2005, 25(5): 129–132

[5] 金善宝. 中国小麦学[M]. 北京：中国农业出版社, 1996: 97
Jin S B. The Wheat Research in China[M]. Beijing: China Agricultural Press, 1996: 97

[6] 胡延吉，赵檀方. 小麦高产育种中粒重作用的研究[J]. 作物学报, 1995, 21(6): 671–678
Hu Y J, Zhao T F. Studies on the effect of grain weight in breeding of high-yielding wheat[J]. Acta Agronomica Sinica, 1995, 21(6): 671–678

[7] Dias A S, Lidon F C. Evaluation of grain filling rate and duration in bread and durum wheat under heat stress after anthesis[J]. Journal of Agronomy and Crop Science, 2009, 195(2): 137–147

[8] 冯素伟，胡铁柱，李淦，等. 不同小麦品种籽粒灌浆特性分析[J]. 麦类作物学报, 2009, 29(4): 643–646
Feng S W, Hu T Z, Li G, et al. Analysis on grain filling characteristics of different wheat varieties[J]. Journal of Triticeae Crops, 2009, 29(4): 643–646

[9] 胡刚元. 温度对冬小麦灌浆时间和灌浆速度的影响[J]. 安徽农业科学, 2012, 40(26): 12836–12837
Hu G Y. Effects of temperature on filling time and filling rate during grain filling period of winter wheat (*Triticum aestivum* Linn.)[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2012, 40(26): 12836–12837

[10] 乔玉强，曹承富，赵竹，等. 超高产小麦品种籽粒灌浆速率及其品质特性分析[J]. 浙江农业学报, 2011, 23(2): 221–225
Qiao Y Q, Cao C F, Zhao Z, et al. Filling rate and filling quality characteristics of super-high-yielding wheat[J]. Acta Agriculturae Zhejiangensis, 2011, 23(2): 221–225

[11] Lawlor D W, Mitchell R A C. Crop ecosystems responses to climatic change: Wheat[M]//Reddy K R, Hodges H F. Climate Change and Global Crop Productivity. Wallingford, UK: CAB International, 2000: 81–106
[12] Blum A. The effect of heat stress on wheat leaf and ear photosynthesis[J]. Journal of Experimental Botany, 1986, 37(1): 111–118
[13] 韩利明, 张勇, 彭惠茹, 等. 从产量和品质性状的变化分析北方冬麦区小麦品种抗热性[J]. 作物学报, 2010, 36(9): 1538−1546
Han L M, Zhang Y, Peng H R, et al. Analysis of heat resistance for cultivars from north China winter wheat region by yield and quality traits[J]. Acta Agronomica Sinica, 2010, 36(9): 1538−1546
[14] 徐如强, 孙其信, 张树榛. 春小麦耐热性的筛选方法与指标[J]. 华北农学报, 1997, 12(3): 22–29
Xu R Q, Sun Q X, Zhang S Z. Screening methods and indices of heat tolerance in spring wheat[J]. Acta Agriculturae Boreali-Sinica, 1997, 12(3): 22–29
[15] 刘萍, 郭文善, 浦汉春, 等. 灌浆期高温对小麦剑叶抗氧化酶及膜脂过氧化的影响[J]. 中国农业科学, 2005, 38(12): 2403–2407
Liu P, Guo W S, Pu H C, et al. Effects of high temperature during grain filling period on antioxidant enzymes and lipid peroxidation in flag leaves of wheat[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2005, 38(12): 2403–2407
[16] 郭文善, 施劲松, 彭永欣, 等. 灌浆期高温对小麦光合产物运转的影响[J]. 核农学报, 1998, 12(1): 21–27
Guo W S, Shi J S, Peng Y X, et al. Effect of high temperature on transportation of assimilate from wheat flag leaf during grain filling stage[J]. Acta Agriculturae Nucleatae Sinica, 1998, 12(1): 21–27
[17] 胡吉帮, 王晨阳, 郭天财, 等. 灌浆期高温和干旱对小麦灌浆特性的影响[J]. 河南农业大学学报, 2008, 42(6): 597–601
Hu J B, Wang C Y, Guo T C, et al. Effects of high temperature and drought stress on grain filling characteristics in wheat during grain filling period[J]. Journal of Henan Agricultural University, 2008, 42(6): 597–601
[18] 傅晓艺, 何明琦, 史占良, 等. 灌浆期高温胁迫对小麦灌浆特性和品质的影响[J]. 麦类作物学报, 2015, 35(6): 867–872
Fu X Y, He M Q, Shi Z L, et al. Effect of high temperature stress during grain-filling period on wheat grain-filling characteristics and quality[J]. Journal of Triticeae Crops, 2015, 35(6): 867–872
[19] 郝立生, 闵锦忠, 张文宗, 等. 气候变暖对河北省冬小麦产量的影响[J]. 中国农业气象, 2009, 30(2): 204–207
Hao L S, Min J Z, Zhang W Z, et al. Impact of climate warming on winter wheat yield in Hebei Province[J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2009, 30(2): 204–207
[20] 陈希勇, 孙其信, 孙长征. 春小麦耐热性表现及其评价[J]. 中国农业大学学报, 2000, 5(1): 43–49
Chen X Y, Sun Q X, Sun C Z. Performance and evaluation of spring wheat heat tolerance[J]. Journal of China Agricultural University, 2000, 5(1): 43–49